第 37 卷第 20 期
2017 年 10 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.20
Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201605261018
徐晓梧,余新晓,宝乐,樊登星,张欢.模拟降雨对常绿植物叶表面滞尘的影响.生态学报,2017,37(20):6785-6791.
Xu X W, Yu X X, Bao L, Fan D X, Zhang H. Impact of simulated rainfall on leaf surface dust of evergreen plants. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6785-6791.

模拟降雨对常绿植物叶表面滞尘的影响

徐晓梧,余新晓*,宝 乐,樊登星,张 欢
北京林业大学,水土保持学院,城乡生态环境北京实验室, 北京 100083

摘要:通过模拟降雨实验的方法,在 15 mm/h 和 30 mm/h 降雨强度的不同历时条件下,从动态变化、滞尘阈值和建立关系 3 个方面量化了降雨过程对叶表面不同粒径颗粒物的影响。研究结果表明:叶表面颗粒物滞留率随降雨历时先急剧下降,后趋于稳定状态。降雨初期对叶面尘的影响最为明显,降雨强度较大时洗脱时间更短。颗粒物滞留量和滞留率的阈值均随降雨强度的增加而减小。颗粒物滞留量阈值呈现出 10—100 μm >2.5—10 μm >0.2—2.5 μm 的规律,与未降雨前一致。侧柏各粒径颗粒物均能被降雨较有效洗脱;大叶黄杨 10—100 μm 的颗粒物更易被降雨洗脱;油松的颗粒物滞留率阈值达 30%—50%,不易被洗脱。降雨量与叶表面颗粒物滞留率有良好的拟合关系,随降雨量的增大,颗粒物滞留率呈指数减小,且减小速率在降雨量 10 mm 内较大,大于 10 mm 后曲线较为平缓。

关键词:叶面尘;模拟降雨;粒径;常绿植物;细颗粒物

Impact of simulated rainfall on leaf surface dust of evergreen plants

XU Xiaowu, YU Xinxiao*, BAO Le, FAN Dengxing, ZHANG Huan
Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083, *China*

Abstract: We utilized a simulated rainfall approach to quantify the influence of the amount and duration of rainfall (15 mm/h and 30 mm/h) on the removal of particles of different diameters from leaf surfaces. We analyzed three aspects of the data—the process of dynamic change, dust retention threshold, and the relationship between rainfall and leaf surface dust. The results showed that the retention rate of leaf surface dust first exhibited a sharp drop and reached a steady state over time. The influence of rainfall on the leaf surface dust was the most obvious at the beginning. The duration of wash-off decreased as rainfall intensity increased. The threshold values for particle retention mass and rate decreased relative to increases in rainfall intensity. The threshold values of particle retention mass were 10—100 μm > 2.5—10 μm > 0.2—2.5 μm, which were consistent with the state before rainfall. Most three-particle size fractions on *Platycladus orientalis* could be washed off quite effectively. Particles of 10—100 μm on *Euonymus japonicus* were more likely to be washed off than the smaller particles. In addition, particles on *Pinus tabuliformis* were not easily washed off, with 30%—50% threshold values for retention rate. Rainfall and particle retention rate fit well and particle retention rate had decreased exponentially as rainfall intensity increased. With a 10 mm change in rainfall, there was a substantial decrease in particle retention rate, after which the decreasing curve became relatively gentle.

Key Words: leaf surface dust; simulated rainfall; particle size; evergreen plants; $PM_{2.5}$

基金项目:北京市共建项目专项(城乡生态环境北京实验室);国家林业公益性行业科研专项(201304301);科技创新服务能力建设-协同创新中心-林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2017_014207_000043)资助

收稿日期:2016-05-26; **网络出版日期**:2017-06-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxinxiao111@126.com

空气颗粒物污染是受到人们广泛关注的环境问题,空气颗粒物是评价大气污染的一项重要指标。空气颗粒物能够长时间悬浮和远距离移动,对人体健康有着较大危害,其引起疾病的风险与颗粒物的粒径大小相关[1]。而与大粒径相比,小粒径的颗粒物较稳定,不易自然沉降[2]。

植物去除空气颗粒物是一项重要的生态系统服务功能,能够减弱大气污染和扬尘对人体健康的危害[3]。植物滞尘的作用受气象条件和植物自身生长状况的影响。其中降雨过程是气象条件中的重要的影响因素,它能够冲洗植物表面滞尘,并将其带入土壤中,使植物表面恢复滞尘能力。Schaubroeck 等阐释了欧洲赤松在降雨影响下叶表面滞尘的输入和输出过程,从而构建了降雨过程森林去除空气颗粒物的模型[4]。王会霞等对典型天气下 4 种常绿植物叶面滞尘动态变化的研究指出,降雨对叶表面颗粒物的洗脱作用与植物和降水特性密切相关[5]。王蕾等对春季天气变化下 4 种针叶树种叶面颗粒物附着密度观测发现,颗粒物不易被中等强度 15 mm 的降雨冲洗掉[6]。Beckett 等认为降水不能完全冲洗掉叶面上滞留的颗粒物[7]。以上天然降雨实验能直接地反映研究结果,但降雨条件的可控性较差,难以更好地量化分析降水特性对叶面尘的影响。Przybysz 等研究发现 20 mm 的模拟降雨能够去除欧洲赤松表面 30%—40% 的滞尘,冲洗掉的颗粒物主要是大粒径而非小粒径颗粒物[8]。房瑶瑶等在模拟降雨条件下研究了北方 11 种树种的洗脱特征,发现树种间没有显著差异,且洗脱率与叶片表面粗糙度无显著相关关系[9]。在冬季阔叶植物落叶后,常绿植物对净化空气有重要意义,但其滞尘作用有限,新生叶吸附颗粒物达到饱和后主要作为储存中介,需要依靠降雨洗脱以达到去除颗粒物和恢复滞尘能力的目的。而在不同降雨强度和历时的条件下,降雨过程对叶表面不同粒径滞尘的影响尚不清楚。

因此,量化降雨和叶表面滞尘周转的关系对揭示降雨过程对植物滞尘的影响有重要的科学意义。本文通过模拟降雨实验,研究 3 种常绿植物在不同降雨强度和历时下叶表面不同粒径滞尘的动态变化过程及滞留阈值特征,并建立降雨量与不同粒径颗粒物滞留率的关系,丰富降雨对植物滞尘影响的研究数据,为更好地选择滞尘树种奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验设计

模拟降雨实验于北京市鹫峰实验林场的北京林业大学降雨大厅进行,人工模拟降雨装置为 QYJY-503C。本文中主要用到降雨大厅的降水系统和控制系统,每个降雨区大小为 8 m×8 m。实验使用 1 个独立降雨区,不同降雨条件通过控制操作台由计算机进行自动降雨调控。降雨过程采用旋转的下喷式和叠加式喷头模拟自然降雨。降雨高度 12 m,分布均匀度达到 85% 以上。根据预实验结果,降雨强度选定 15 mm/h 和 30 mm/h,最大降雨量为 15 mm。

1.2 实验材料

实验所选北京市常见植物共 3 种,常绿乔木为侧柏(*Platycladus orientalis*)和油松(*Pinus tabuliformis*),常绿灌木为大叶黄杨(*Euonymus japonicus*)。相关研究表明植物的叶面滞尘能力约在 15—24 d 以上达到饱和(即最大滞尘量),这与植物所处污染环境有关[10-11]。实验所用样品为栽种的树苗,树高约 80 cm。降雨前采集的为雨后滞尘 20 d 的叶片样品,滞尘地点为降雨大厅开敞的空旷地。待降雨稳定后,将盆栽放置于降雨区内,按时间间隔采集经降雨淋洗后的叶片样品,每种样品采集 3 组。根据其实际生长状况选择 3—5 株盆栽用于 1 次降雨过程实验,同种植物盆栽生长状况基本相同。

1.3 分析方法

颗粒物量通过测算的单位叶面积滞尘量来表达,采用洗脱称重法测量[12]。首先将从盆栽上采集的叶片装入烧杯中,倒入超纯水进行超声波清洗,取出叶片后利用真空泵过滤装置对洗出的悬浮液进行抽滤。根据我国环境空气质量标准,将空气动力学直径小于 100 μm 的空气颗粒物称为总悬浮颗粒物(TSP),小于 10 μm 的称为可吸入颗粒物(PM_{10}),小于 2.5 μm 的称为可吸入肺颗粒物($PM_{2.5}$)。因此,通过 100 μm 的筛子过滤

后,依次使用不同孔径滤膜保留得到 10—100 μm、2.5—10 μm 和 0.2—2.5 μm 的颗粒物。滤膜在过滤前后均 60℃烘干 30 min,在恒温恒湿箱中平衡 24 h 后用十万分之一天平称重。通过 3 次过滤,3 种滤膜过滤前后的差值为 3 种粒径范围颗粒物的质量。清洗后的叶片经过扫描仪扫描后用 Image J 计算图像,扫描两次取平均值得到表面积。本实验中单位叶面积的滞尘量的计算方程如下:

$$P=(M_2-M_1)/S \quad (1)$$

其中,P 为单位叶面积滞尘量,M_2、M_1为过滤前后滤膜质量,S 为取样叶片的叶面积;

本实验在室内静风条件下进行,不考虑二次悬浮。人工降雨中不接触叶片的湿沉降较少,因此将截留在叶表面的湿沉降视作为 0。叶片滞尘包括蜡质层阻滞和叶表沉积,降雨主要影响叶表面滞尘,不考虑蜡质层阻滞量,仅测定降雨前后叶表面滞尘结果。本实验中叶表面颗粒物动态平衡方程如下:

$$W_N= P_N/P_0\times100\% \quad (2)$$

式中,W_N为不同降雨时段内下叶片滞尘的滞留率;P_0为降雨前单位叶面积滞留干沉降,P_N为单位叶面积剩余滞尘量,N 为降雨时长且大于 0。

滞留阈值为降雨影响下颗粒物滞留的最低值,其特征为与前后时间点的值无显著差异。本文中滞留量阈值取降雨结束时单位叶面积滞尘量,滞留率阈值取降雨结束时叶片滞尘的滞留率。

2　结果与分析

2.1　降雨影响下叶面滞尘的动态变化

3 种常绿植物在不同降雨强度和历时条件下,叶表面滞尘的滞留率随降雨量变化过程如图 1 所示。从图中可以看出,当降雨强度为 15 mm/h 时,大叶黄杨和侧柏滞留率在降雨 10 min 内显著下降,且下降幅度为全

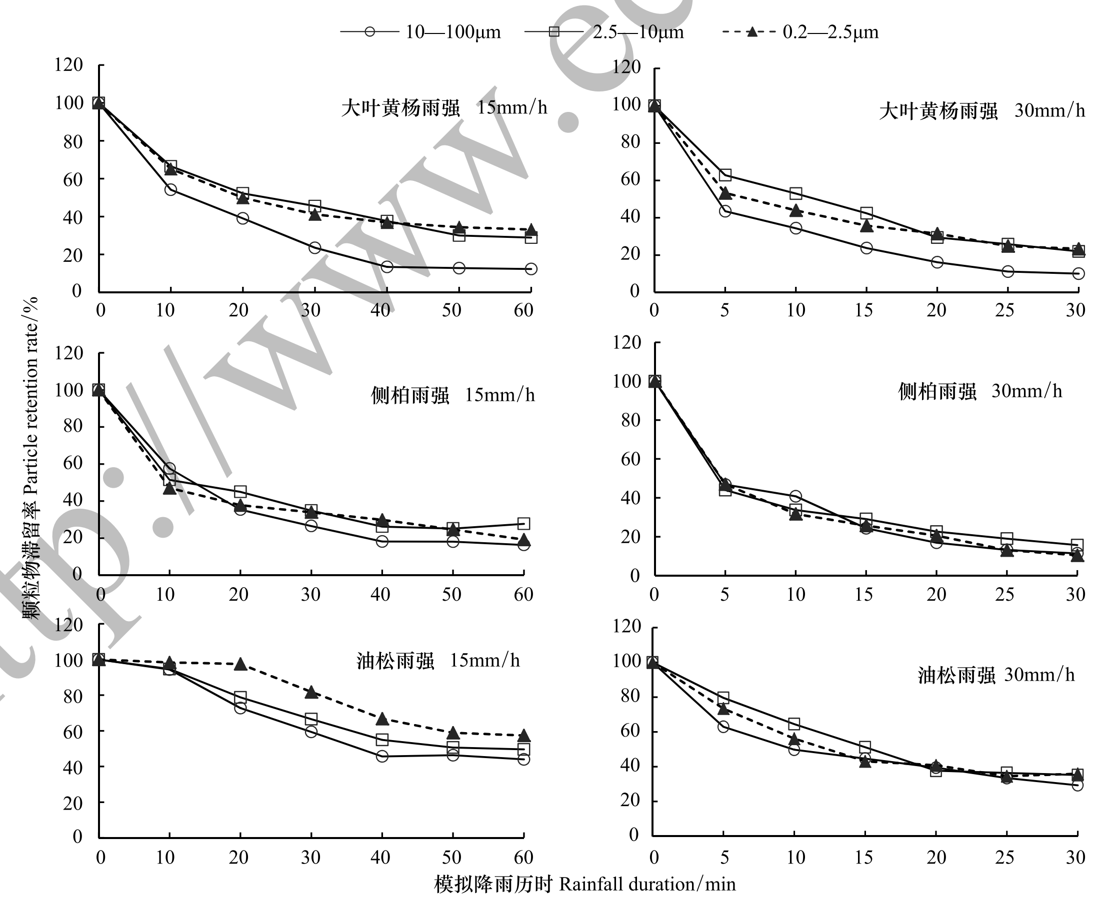


图 1　模拟不同降雨强度和历时下叶表面颗粒物滞留率的变化过程

Fig.1　Change process of leaf surface particle retention rate at different rainfall intensity and duration

过程中最大,40 min 后趋于平稳状态;油松滞留率在降雨 10 min 内基本不变,此后与大叶黄杨和侧柏的变化规律相似。当降雨强度为 30 mm/h 时,大叶黄杨和侧柏的变化规律与 15 mm/h 相似,但下降趋势在 5 min 内更急剧,5—20 min 内更平缓;油松滞留率在 15 min 内迅速下降,后趋于稳定。这说明颗粒物的滞留率会受更大降雨强度的影响而降低,且达到滞留阈值的时间会提前。

2.2 降雨影响下叶面尘的滞留阈值

3 种常绿植物叶表面颗粒物的滞留量阈值如图 2 所示。在不同降雨强度下,叶表面滞留量阈值大叶黄杨>侧柏>油松,平均 TSP 滞留量阈值由大到小依次为(24.68±5.17) μg/cm^2、(16.20±4.84) μg/cm^2 和(9.77±3.14) μg/cm^2(Mean±SD,N=6)。3 种植物不同粒径颗粒物滞留量阈值均为 10—100 μm >2.5—10 μm>0.2—2.5 μm,这与未降雨前分粒径的最大滞尘量一致。从图中可以看出,10 μm 以上悬浮颗粒物的滞留量阈值均显著高于 10 μm 以下颗粒物(ANOVA,P<0.05,下同)。3 种粒径范围颗粒物的滞留量阈值均在降雨强度 15 mm/h 时大于 30 mm/h 时。不同降雨强度下,大叶黄杨和侧柏 2.5 μm 以上颗粒物的滞留量阈值差异显著,2.5 μm以下不明显;油松各粒径范围颗粒物的滞留量阈值均无显著差异。

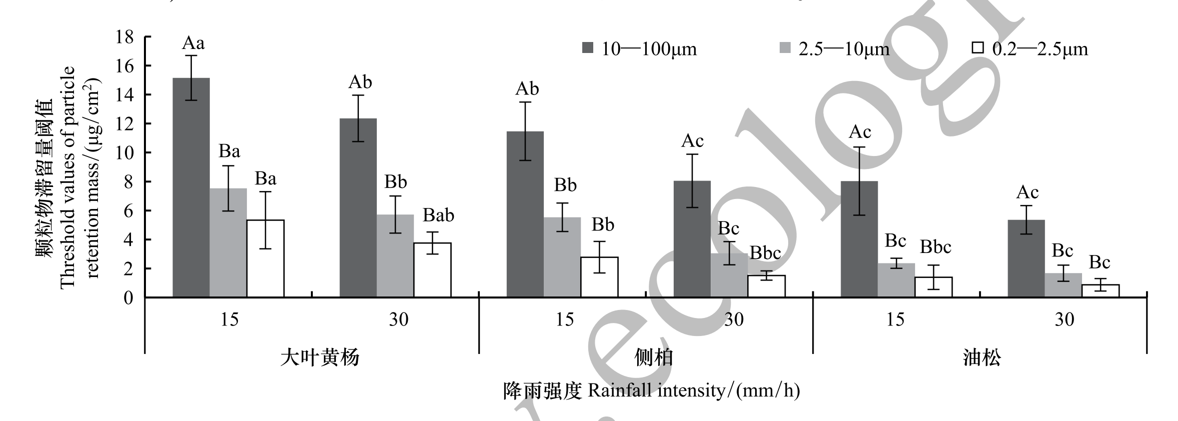


图 2 在不同降雨强度下叶表面颗粒物滞留量阈值

Fig.2 Threshold values of leaf surface particle retention mass at different rainfall intensity

* 不同大写字母表示粒径间 LSD 多重比较结果在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示不同植物和降雨强度间在 0.05 水平上差异显著

3 种常绿植物在不同降雨强度下叶表面滞尘率阈值多重比较结果如表 1 所示。总的来说,叶表面平均滞尘率阈值油松>大叶黄杨>侧柏,不同粒径颗粒物滞留率阈值呈现出 10—100 μm<2.5—10 μm<0.2—2.5 μm,与滞尘量阈值的特征相反。不同粒径的颗粒物滞留率阈值在 3 种植物上表现不同:大叶黄杨 10 μm 以上颗粒物显著低于 10 μm 以下颗粒物;侧柏仅在降雨强度 15 mm/h 下 2.5—10 μm 颗粒物大于另两种;油松的滞尘率阈值在不同粒径间无显著差异。颗粒物滞留率阈值在降雨强度 15 mm/h 时大于 30 mm/h 时,但仅油松各粒径范围和侧柏 2.5—10 μm 的颗粒物差异显著。这说明降雨对油松表面的颗粒物洗脱能力较弱,但受降雨强度影响明显。大叶黄杨和侧柏则 10—100 μm 的颗粒物更易被降雨洗脱,即能够恢复更多的滞尘潜力。

表 1 在不同降雨强度下叶表面颗粒物滞留率阈值/%

Table 1 Threshold values of leaf surface particle retention rate at different rainfall intensity

植物种 Species	雨强 Rainfall intensity/mmh/h	10—100 μm	2.5—10 μm	0.2—2.5 μm
大叶黄杨 *Euonymus japonicus*	15	12.32±1.26Ac	28.91±6.00Bbc	33.19±12.28Bab
	30	9.65±0.67Ac	21.97±4.91Bcd	23.40±4.73Bb
侧柏 *Platycladus orientalis*	15	16.29±2.86Ac	28.43±5.03Bbc	19.19±7.54Ab
	30	11.43±2.61Ac	15.69±4.13Ad	10.45±2.19Ab
油松 *Pinus tabuliformis*	15	43.96±12.87Aa	49.59±7.39Aa	50.76±24.59Aa
	30	29.33±5.39Ab	35.21±11.69Ab	35.91±17.85Aab

* 不同大写字母表示粒径间 LSD 多重比较结果在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示不同植物和降雨强度间在 0.05 水平上差异显著

2.3　降雨量与叶面尘的关系

在实际降雨中,降雨强度并不是恒定的,因此将在不同降雨历时下的两种降雨强度合并,建立降雨量与叶表面 3 种粒径颗粒物的滞留率的拟合关系和方程系数见图 3 和表 2。拟合的结果显示降雨量与叶表面颗粒物滞留率有较良好的拟合关系($P<0.001$)。随降雨量的增大,颗粒物的滞留率呈指数减小,因此颗粒物滞

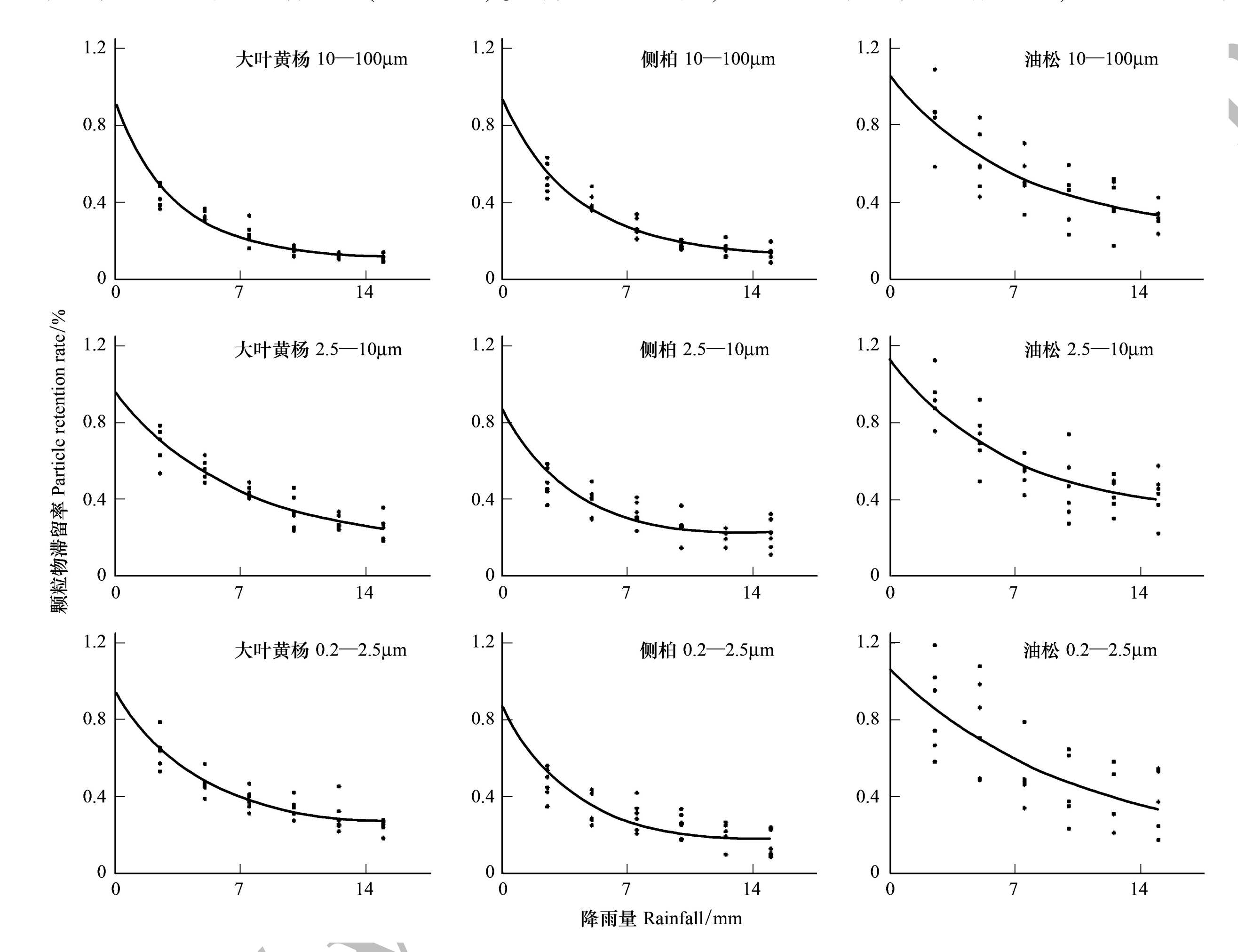


图 3　降雨量与叶表面三种粒径颗粒物滞留率的关系

Fig.3　Relationships of rainfall and leaf surface particles retention rate in three kinds of particle size

表 2　降雨量与叶表面 3 种粒径颗粒物滞留率的拟合方程($y = \exp(a+b\times x+c\times x^2)$)系数

Table 2　Coefficients of fitting equation of rainfall and leaf surface particles retention rate in three kinds of particle size

植物种 Species	粒径/μm Particle size fractions	系数 Coefficient			
		A	b	c	R^2
大叶黄杨	10—100	−0.082±0.049	−0.272±0.022	0.009±0.002	0.922
Euonymus japonicus	2.5—10	−0.132±0.074	−0.208±0.027	0.008±0.002	0.772
	0.2—2.5	−0.054±0.056	−0.161±0.02	0.005±0.001	0.855
侧柏	10—100	−0.060±0.051	−0.223±0.022	0.006±0.002	0.919
Platycladus orientalis	2.5—10	−0.039±0.053	−0.128±0.019	0.002±0.001	0.887
	0.2—2.5	−0.137±0.081	−0.220±0.032	0.008±0.002	0.770
油松	10—100	0.058±0.096	−0.113±0.032	0.002±0.002	0.657
Pinus tabuliformis	2.5—10	0.127±0.085	−0.111±0.028	0.003±0.002	0.687
	0.2—2.5	0.066±0.134	−0.089±0.047	0.001±0.003	0.515

留率受降雨量影响很大。并且在降雨过程开始的 10 mm 内颗粒物滞留的减小速率较大,大于 10 mm 以后减小曲线较为平缓。这说明叶表面滞尘在降雨过程初期所受影响更大,后逐渐达到降雨影响下叶表面颗粒物滞留的阈值,基本不再因降雨影响而减少。

3 讨论

3.1 降雨对叶面尘的影响

研究降雨过程对叶表面滞尘的影响是揭示植物去除空气中 $PM_{2.5}$ 等颗粒物作用的重要内容,实验结果证明降雨强度和历时均对叶表面滞尘的动态变化过程以及滞留阈值有显著影响。除油松叶表面滞尘在 15 mm/h 降雨的初期保持稳定外,叶表面颗粒物的滞留率在降雨影响下均呈现出先急剧下降,最后趋于稳定状态的动态变化规律。这表明降雨初期对叶表面滞尘的影响最为明显,后逐渐减弱。降雨初期叶表面滞尘中的水溶性颗粒物会溶解在水中[6],经测定油松的叶面尘中水溶性离子含量占 24%,大叶黄杨和侧柏为 30%。颗粒物水溶性离子比例在大气中高于在叶表面上,这是由于湿度高的大气更有利于延长离子的寿命并形成二次离子[13]。目前鲜有对叶面尘中水溶性离子比例的分析,并且北京大气颗粒物 PM_{10} 中水溶性离子含量占到 TSP 中的 90%以上[13],但叶表面颗粒物难以使用颗粒物切割器采集,不同粒径颗粒物的水溶性离子比例的变化也有待研究。

3.2 不同植物的洗脱特征差异

当降雨强度为 15 mm/h,降雨量为 2.5 mm 时,油松叶表面颗粒物不易被洗脱,而大叶黄杨和侧柏叶表面携带颗粒物的截流更易达到饱和持水而流下。而当降雨强度为 19.8 mm/h,降雨量为 2.67 mm 时树种间无显著差异[9],这说明降水特性的差异会影响洗脱结果。降雨并不能将叶表面滞尘完全冲洗干净,这与王赞红等对大叶黄杨的深度清洗实验结果一致[11]。降雨对大叶黄杨 0.2—10 μm 颗粒物的洗脱作用不如 10—100 μm 颗粒物,这与其叶表面小室边缘突起结构可深藏小颗粒物有关[14]。侧柏叶表面有脊状突起形成的沟槽,降雨对其不同粒径颗粒物的影响小于大叶黄杨的小室。这与吸附大气颗粒物的研究结果相反[14],说明叶表面微结构对颗粒物的吸附和洗脱滞留的影响存在差异。油松由于具有粘性分泌物使颗粒物不易被洗脱,与王蕾等研究结果一致[6],同时本研究发现油松叶表面颗粒物的滞留率会受降雨强度增大影响而显著减少。

3.3 模拟降雨实验的局限性

本研究证明降雨量与叶表面颗粒物滞留率有较好的拟合关系,更详细地量化了降雨对不同粒径颗粒物的影响,对室外和已有模拟实验中存在的局限性进行了补充[5,9]。模拟实验受多种因素的影响,降雨前的最大滞尘量、盆栽植物与野外植物的状况差异以及测量误差都会造成实验结果存在一定差异。因此今后模拟实验不仅要研究降雨强度和历时对叶面尘的影响,也应考虑各干扰因素下实验结果的校正。

模拟降雨动能与降雨强度呈线性关系,可通过控制降雨强度实现模拟降雨与天然降雨的相似性[15]。相比天然降雨实验结果[5-6],本模拟实验中洗脱叶面尘所需的降雨量更小,这是由于天然降雨选取指标通常为 24 h 降雨量,模拟降雨为 1 h 降雨量,实际降雨强度大于天然降雨实验中常见的小雨到中雨。而较小强度的模拟降雨均匀度不够,这种受设备的限制所产生的差异有待于今后技术提高。另外,天然降雨中的湿沉降也是叶表面颗粒物的一个输入途径[16],会如何影响叶表面滞尘结果还需要进一步的研究。

4 结论

(1)降雨初期对叶表面滞尘的影响最为明显,后逐渐减弱。当降雨强度增大时,洗脱颗粒物的时间减少,滞留率降低。

(2)颗粒物滞留量随雨强的增加而减小,除油松外均差异显著。不同粒径颗粒物滞留量阈值呈现出 10—100 μm >2.5—10 μm>0.2—2.5 μm,与未降雨前的最大滞尘量保持一致。

(3)颗粒物滞留率随雨强的增加而减小,但仅侧柏 2.5—10 μm 和油松差异显著。各树种滞留率阈值表

现不同:侧柏各粒径的颗粒物为 10—30%,洗脱效果较好;大叶黄杨 0—10μm 和 10—100 μm 的颗粒物分别为 20%—35%和 10—15%,大粒径更易被降雨洗脱;油松达 30%—50%,不易被洗脱。

(4)降雨量与颗粒物滞留率有良好的拟合关系,随着降雨量的增大,颗粒物的滞留率呈指数减小。降雨初期 10 mm 内颗粒物较快减小,后减小曲线趋于平缓。

参考文献(References):

[1] Kim K H, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environment International, 2015, 74: 136-143.
[2] Petroff A, Mailliat A, Amielh M, Anselmet F. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. Atmospheric Environment, 2008, 42(16): 3625-3653.
[3] Escobedo F J, Kroeger T, Wagner J E. Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 2078-2087.
[4] Schaubroeck T, Deckmyn G, Neirynck J, Staelens J, Adriaenssens S, Dewulf J, Muys B, Verheyen K.. Multilayered modeling of particulate matter removal by a growing forest over time, from plant surface deposition to washoff via rainfall. Environmental Science and Technology, 2014, 48(18): 10785-10794.
[5] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化. 生态学报, 2015, 35(6): 1696-1705.
[6] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 高尚玉. 北京市春季天气状况对针叶树叶面颗粒物附着密度的影响. 生态学杂志, 2006, 25(8): 998-1002.
[7] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Effective tree species for local air-quality management. Journal of Arboriculture, 2000, 26(1): 12-19.
[8] Przybysz A, Sæbø A, Hanslin H M, Gawroński S W. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. Science of the Total Environment, 2014, 481: 360-369.
[9] 房瑶瑶, 王兵, 牛香. 叶片表面粗糙度对颗粒物滞纳能力及洗脱特征的影响. 水土保持学报, 2015, 29(4): 110-115.
[10] 邱媛, 管东生, 宋巍巍, Peart M R. 惠州城市植被的滞尘效应. 生态学报, 2008, 28(6): 2455-2462.
[11] 王赞红, 李纪标. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态. 生态环境, 2006, 15(2): 327-330.
[12] Dzierżanowski K, Popek R, Gawrońska H, Sæbø A, Gawroński S W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.
[13] 刁谞, 张霖琳, 王超, 陈烨, 吕怡兵, 滕恩江. 京津冀冬季与夏季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析. 环境化学, 2015, 34(1): 60-69.
[14] 王蕾, 高尚玉, 刘连友, 哈斯. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究. 应用生态学报, 2006, 17(4): 597-601.
[15] 霍云梅, 毕华兴, 朱永杰, 许华森, 王晓贤, 常译方. QYJY-503C 人工模拟降雨装置降雨特性试验. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 31-36.
[16] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. Environmental Pollution, 1998, 99(3): 347-360.